我国北方地区清洁供暖技术现状与问题探讨

姚 华[1] 黄 云[1*] 徐敬英[1] 马光宇[2] 王 燕[1] 刘常鹏[2] 孙守斌[2]

1 中国科学院过程工程研究所 多相复杂系统国家重点实验室 北京 100190

2 鞍钢股份有限公司技术中心 鞍山 114021

摘要 近年来，我国北方地区雾霾天气频发，京津冀地区尤为严重。受经济成本、取暖模式等诸多因素影响，短期内燃烧化石能源仍为北方地区冬季取暖的主要形式。推进我国北方地区冬季清洁取暖工作是中央提出的一项重要战略部署。文章回顾了区域供热技术发展的大致历程，介绍了近10年来国家相关的供热政策，详细比对分析了我国北方现有各项清洁供暖技术的优劣，包括：清洁燃煤供暖、天然气供暖、电制热供暖、地热供暖、生物质能清洁供暖、太阳能供暖、工业余热供暖、核能供暖等，最后对清洁供暖领域存在的关键共性问题进行了深入剖析，并探讨解决路径。为推进我国北方地区清洁取暖工作的可持续发展，建议今后围绕3个方面重点开展工作：（1）逐步建立清洁取暖科学评价体系，从全生命周期角度主要考量能效指标、经济指标和环境影响指标等性能参数；（2）有序推进供热管网节能改造和采暖末端能效提升，逐步健全现有供热系统评价体系，对于供热管网先评估后改造，逐一突破；（3）积极探索多方共赢长效机制，注重顶层设计与协调，加强区域政策配套与完善。

关键词 清洁取暖，区域供热，技术分析，科学评价

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20191125001

近年来，每当供暖季前后，我国北方地区雾霾天气频发，京津冀地区尤为严重。虽然有资料表明[1]，2018年我国平均霾日数、霾天气过程次数和影响面积均比2017年有所减少，但雾霾天气的频繁出现，直接影响到人们的日常生产生活，甚至危害健康[2,3]。究其原因，我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋导致国内能源消费结构失衡[4]，成为我国大气污染的根源。经初步核算[5]，2019年我国全年能源消费总

* 通讯作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA21070302），国家重点研发计划（2017YFB0903601），多相复杂系统国家重点实验室自主研究课题（MPCS-2019-A-10）

修改稿收到日期：2020年8月25日

量48.6亿吨标准煤，其中煤炭消费量占能源消费总量的57.7%，比2018年下降了1.5%，而天然气、水电、核电、风电等清洁能源消费量占总量的23.4%，上升了1.3%。虽然清洁能源消费比重略有上升，但化石能源仍然是我国能源消费结构的主体[6]。京津冀地区冬季的氮氧化物（NO_x）排放量绝大部分来自供暖燃料的燃烧[7,8]。受经济成本、取暖模式等诸多因素影响，短期内燃烧化石能源仍为北方地区冬季取暖的主要形式。截至2016年底，北方地区燃煤取暖面积约占北方地区总取暖面积的83%，天然气、电、地热能、生物质能、太阳能、工业余热等合计约占17%[9]。因此，我国北方地区迫切需要推进清洁取暖。

本文着眼于我国北方清洁取暖工作的可持续发展，回顾了区域供热技术发展的大致历程和近10年来国家相关的供热政策，阐述了我国北方现有各项清洁供暖技术的优劣，包括：清洁燃煤供暖、天然气供暖、电制热供暖、地热供暖、生物质能清洁供暖、太阳能供暖、工业余热供暖、核能供暖等，对清洁取暖领域存在的问题进行深入剖析，并给出相应的解决路径。

1 区域供热技术发展历程

14世纪，在法国绍代艾盖县城运行的一套热水供热系统，被认为是世界上第一套区域供热系统[10]。该套系统以地热作为热源，可同时满足30间房屋的供热需求。之后，区域供热技术从燃煤锅炉房到热电联产，再到热电冷联产，逐步发展与完善。在区域供热技术发展的历程中（图1）[11]，储热装置在第二代、第三代技术中就已经出现，而在第四代技术中，除了常规储热装置外，还有其他多种储热形式予以补充，以减缓可再生能源间歇性的影响。

与前三代区域供热技术相比，第四代将充分利用一切可用的能源，包括太阳能、地热能、风能、生物质能、工业余热等，借助规模化储热技术，实现真正的低温供热（供水温度55℃/回水温度25℃）[12]。这样不仅可减少散热损失，提高系统效率，更有利于低品位热能的并入，而且投资成本并没有大幅增加。我国区域供热技术尚处于第三代。第四代区域供热技术契合了当前清洁取暖的国家战略需求，是政策引导下取暖领域的供给侧结构性改革，有利于从源头消除雾霾等环境问题，因此有必要大力推动第四代区域供热技术的应用。

2 我国清洁取暖的相关政策

清洁取暖是指利用天然气、电、地热、生物质、太阳能、工业余热、清洁化燃煤（超低排放）、核能等清洁化能源，通过高效用能系统实现低排放、低能耗的取暖方式[9]。清洁取暖包含以降低污染物排放和能源消耗为目标的取暖全过程，涉及清洁热源、高效输配管网（热网）、节能建筑（热用户）等环节。清洁取暖的主要方式包括清洁燃煤供暖、天然气供暖、电制热供暖、可再生能源供暖和工业余热供暖等。

近年来，我国政府相继出台了一系列有关供暖的相关政策文件。2006年，国务院出台了《国务院关于加强节能工作的决定》，指出供暖要商品化，按用热量计量收费。同年，财政部印发《可再生能源建筑应用专项资金管理暂行办法》，明确提出支持利用可再生能源进行采暖制冷，包括利用热泵技术等。国家能源局于2007年发布的《能源发展“十一五”规划》指出从分布式锅炉转变为集中供暖，以及新建热电联产节能标准；2013年发布的《能源发展“十二五”规划》要求发展天然气热电联产、热力网建设等；2017年发布的《能源发展“十三五”规划》提出推广热电冷三联供和生物质热电联产、地热能供暖、低品位余热供暖等。

推进北方地区清洁取暖工作已成为中央提出的一项重要决策部署。尤其进入“十三五”后，《北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021年）》[9]《关于推

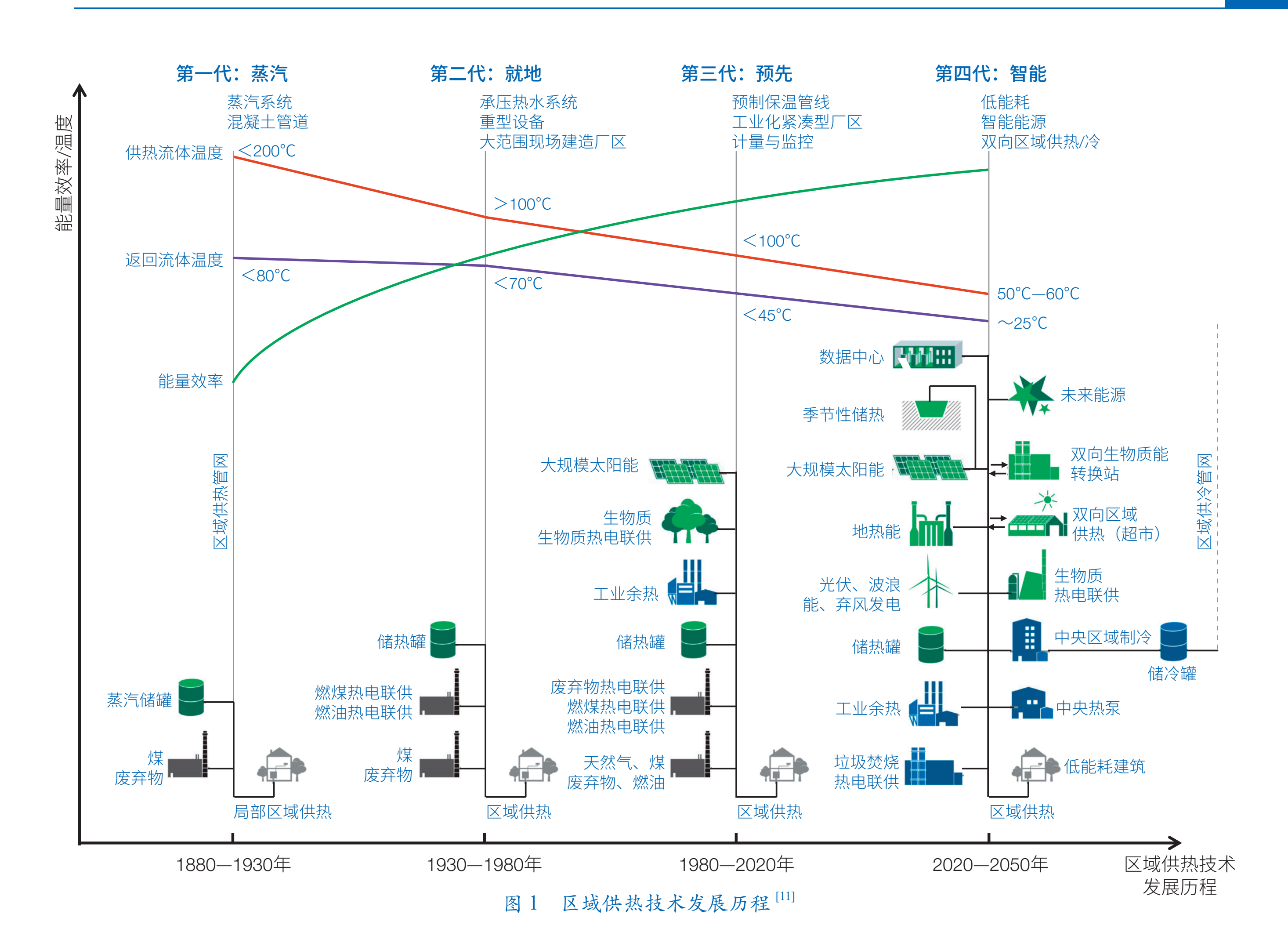


图 1　区域供热技术发展历程[11]

进北方采暖地区城镇清洁供暖的指导意见》《清洁能源消纳行动计划（2018—2020 年）》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《绿色产业指导目录（2019 年版）》等相关政策文件的密集推出，也彰显了国家大力发展清洁取暖工作的决心与信心。

3 我国清洁供暖技术现状

3.1 清洁燃煤供暖

清洁燃煤集中供暖指实施超低排放技术改造后，将实现超低排放标准的燃煤热电联产和大型燃煤锅炉通过热网系统向用户供暖的方式。

我国接近 70% 的燃煤发电机组已经实现“超低排放”，预计到 2020 年底，大中型燃煤发电机组将 100% 完成“超低排放”改造和能效提升[13]。统计数据表明，截至 2018 年底我国北方地区清洁燃煤集中供暖面积约为 58.95 亿平方米①，且均为燃煤热电联产集中供暖。成本低廉是燃煤热电联产的最大优势，并且清洁燃煤集中供暖能够覆盖已有热力管网系统的城市集中供暖地区；但是，其劣势也同样明显——集中供热管网难以延伸至广大农村地区。

推动“好煤配好炉”方案的实施是民用散煤燃烧污染治理过程中的一项重要举措[13,14]。在我国农村地区，散煤是冬季取暖的主要燃料，占生活用煤的 90% 左右[15]。但农村大部分地区供暖设备技术较为

① 中国城镇供热协会 . 中国城镇供热 2020 发展报告 .

落后，散煤不充分燃烧导致大量颗粒物、SO_2、NO_x等直接排入大气，造成巨大能量浪费，并加重环境污染。“好煤”指洁净型煤、兰炭等清洁煤。洁净型煤是通过将粉煤、煤矸石与农作物秸秆混合，并加入节能减排增效剂，经挤压成型后制得。因其原料中添加了节能减排增效剂，可促进硫元素充分氧化后固化在炉灰中，同时减少 CO 的生成。兰炭是利用神府煤田盛产的优质侏罗系精煤块烧制而成，其固定碳高、化学活性高，灰分、硫、磷等杂质含量低，是与优质无烟煤排放接近的清洁煤[16]。“好炉”指经过技术改造后的高效节能炉具。好炉需要与对应燃料配套使用，如洁净型煤+解耦炉具（图 2）[17]等。据炉具行业 2017 年调查数据，我国 1.6 亿户农村居民家庭中，燃煤取暖约占 41.3%，散煤用量约 2 亿吨。全国供暖炉具市场容量达 1.86 亿台，商品化炉具市场保有量约 1.2 亿台[15]。我国北方多地已开展洁净型煤、兰炭等清洁煤及相关配套高效节能炉具的推广。

3.2 天然气供暖

天然气供暖指以天然气为燃料，利用脱氮改造后的燃气锅炉、燃气热电联产等进行集中供暖，以及燃气热泵、壁挂炉等进行分散供暖。与燃煤供暖相比，天然气供暖热效率更高，烟尘及 SO_2 的排放量更低；与电制热供暖相比，天然气供暖经济性更好。燃气-蒸汽联合循环冷热电联供系统（图 3）[18]为该技术的典型代表之一。

截至 2018 年底，我国北方地区天然气供暖面积约为 28 亿平方米，占总取暖面积 15.3%[19]。随着“煤改气”清洁供暖的稳步推进，天然气需求量大增，2019 年我国天然气进口量约 1 373 亿立方米，对外依存度仍为 45.2%[20]，其供应保障能力较弱。再者，由于天然气管道铺设非常复杂，成本较高，而且一旦受到破坏，将对周边环境及人们的生命财产安全造成极大危害。因此，天然气管网覆盖范围相对较小，很多农村地区仍然无法到达。

3.3 电制热供暖

电制热供暖指利用电能，使用普通电锅炉、蓄热电锅炉、电锅炉+水蓄热、电锅炉+相变蓄热等集中供暖方式，以及发热电缆、电热膜、碳晶、热轨、碳纤维、直热式电暖器、蓄热式电暖器等分散供暖方式，还包括各类电驱动热泵等方式进行供暖。

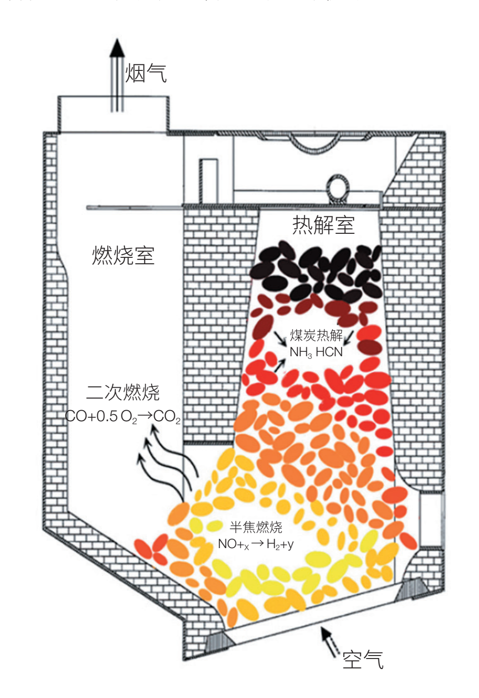


图 2　解耦炉结构示意图[17]

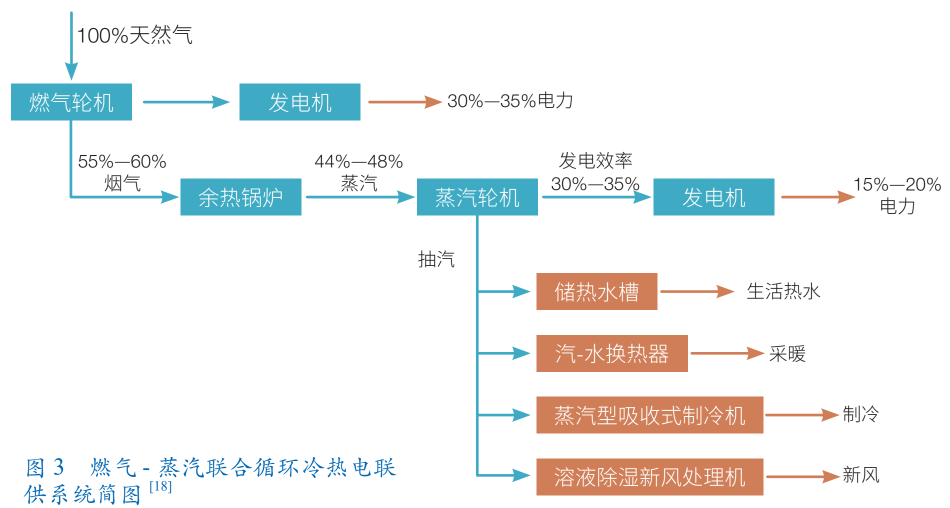


图 3　燃气-蒸汽联合循环冷热电联供系统简图[18]

截至 2017 年底，我国北方地区电制热供暖面积约 10.3 亿平方米[21]。与燃煤供暖及燃气供暖相比，电制热供暖布置灵活，且用户端无污染物排放，适用于热力管网、天然气管网难以覆盖的农村地区。当前，空气源热泵、蓄热式电暖器等已成为“煤改电”清洁供暖政策推广的主流产品。然而，我国北方农村地区户均电网线路容量只有 2—3 千瓦，而普通型家用电制热储热供暖装置需达到 9—10 千瓦，大规模高压电制热储热供暖系统（图 4）[22]则需达到几百千瓦甚至几兆瓦，这就涉及大规模的农村电网增容改造，以及房屋保暖改造等基础设施建设，导致电制热供暖成本较高。

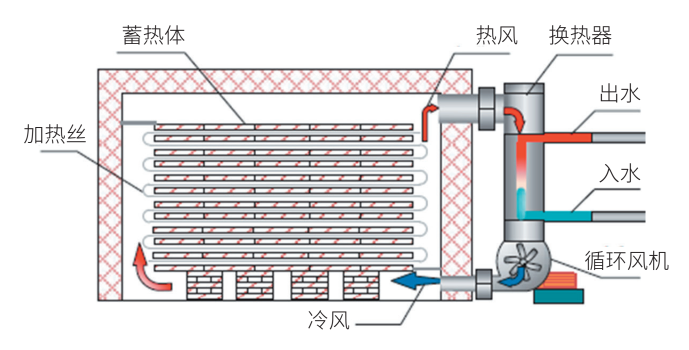


图 4 大规模高压电制热储热供暖系统结构简图[22]

3.4 地热供暖

地热供暖指利用地热资源，使用换热系统提取地热资源中的热量向用户供暖，可作为集中式或分散式供暖热源[9]。按照埋存深度和温度等级，地热供暖可分为浅层地热资源、水热型地热资源和干热岩型地热资源。目前，浅层和水热型地热能供暖（制冷）技术已基本成熟——浅层地热能采用热泵技术提取热量，而水热型地热能通过人工钻井或天然通道开采利用；干热岩型地热能开发尚处于起步阶段，我国 2012 年才启动关于干热岩热能开发与综合利用技术的专项研究。地热与调峰锅炉联合供暖系统（图 5）[23]是地热供暖的典型方式。

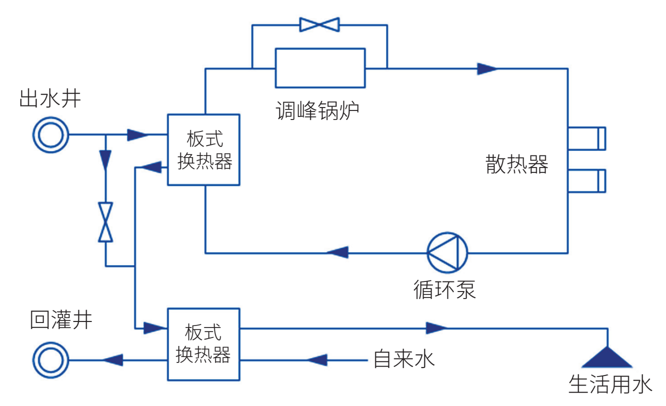


图 5 地热与调峰锅炉联合供暖系统示意图[23]

截至 2017 年底，我国水热型地热能供暖建筑面积已达 1.5 亿平方米[23]。预计到 2020 年底，我国地热供暖（制冷）面积累计将达到 16 亿平方米，地热能供暖年利用量将达到 4 000 万吨标准煤②。

3.5 生物质能清洁供暖

生物质能清洁供暖指利用生物质原料及其转化燃料在专用设备中清洁燃烧供暖的方式，包括：排放达标的生物质热电联产和大型生物质锅炉等集中供暖，以及中小型生物质锅炉等分散供暖[9]。

我国生物质能清洁供暖技术发展还处在初期。截至 2018 年底，我国北方地区生物质能清洁供暖面积达 6.4 亿平方米[21]。我国农作物秸秆及农产品加工剩余物、林业剩余物等生物质资源丰富，每年可供能源化利用约 4 亿吨标煤，因此发展生物质能供热具有较好的资源条件。但是，我国中小型燃煤供热锅炉数量较多，清洁取暖替代任务较重。这就使得生物质能供暖在终端消费环节直接替代燃煤有较大的发展空间，如：生物质固体成型燃料高效燃烧供暖、沼气燃烧供暖和村镇微型生物质热电联产供暖等。预计到 2020 年底，生物质热电联产装机容量超过 1 200 万千瓦，生物质成型燃料年利用量约 3 000 万吨，生物质燃气（生物天然气、生物质气化等）年利用量约 100 亿立方米，生物质能供暖合计折合供暖面

② 国家发改委，国家能源局，国土资源部．地热能开发利用“十三五”规划．[2017-01-23]. http://www.nea.gov.cn/2017-02/06/c_136035635.htm.

积约10亿平方米③。

3.6 太阳能供暖

太阳能供暖指利用太阳光热能，借助太阳能集热装置，配合其他稳定性好的清洁供暖方式向用户供暖。太阳能供暖可分为主动式和被动式。根据热媒不同，主动式太阳能供暖可分为太阳能空气供暖和太阳能热水供暖2种类型[24]。太阳能空气供暖主要针对单层、闲置农房，其系统启动快、耐冻，但效率低。太阳能热水供暖是从太阳能生活热水基础上发展而来，其系统效率高、易安装，但控制不当易发生冻害、过热等问题。被动太阳房是被动式太阳能供暖的典型代表，20世纪80年代初就已在北方地区广泛应用。

太阳能供暖具有使用寿命长、应用场景广泛等特点；在同等供热情况下，可节约40%—60%的能源成本。目前，集中式太阳能区域供暖是国际发展的趋势和方向。预计到2021年，我国太阳能供暖面积将达5 000万平方米[9]。太阳能储热式多能互补供热系统（图6）[25]是太阳能供暖的典型代表之一。

3.7 工业余热供暖

工业余热供暖指回收工业生产过程中伴生的余热，经换热装置提质后进行供暖的方式。与燃煤供暖、天然气供暖、电制热供暖相比，工业余热供暖在技术及经济上均具有较好的可行性。但工业余热种类繁多，其数量和形态在时间或空间上也常具有不确定性，囿于传统余热回收技术水平，难以被高效利用。而储热技术的优势，恰恰能够缓解能量供需双方在时空、强度与地域上不匹配的矛盾。将储热技术与工业余热清洁供暖技术有机结合，可进一步提升余热转换效率。可移动式工业烟气余热储热供暖（图7）[26,27]是该技术的典型代表之一。

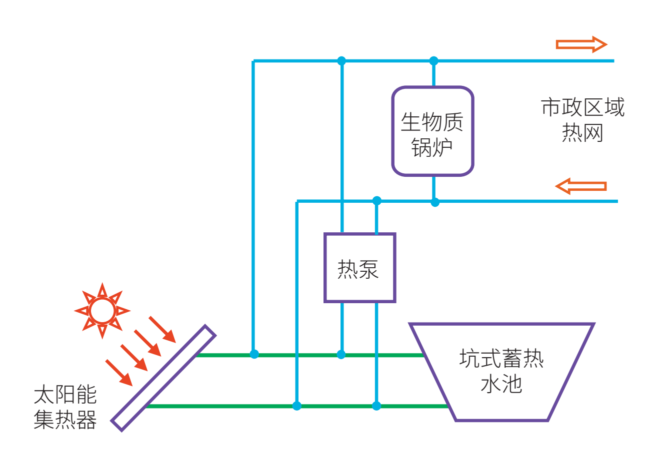


图6 太阳能储热式多能互补供热系统简图[25]

截至2016年底，我国北方地区工业余热供暖面积约1亿平方米；预计到2021年，我国工业余热（不含电厂余热）供暖面积将达2亿平方米[9]。

3.8 核能供暖

核能供暖指以核裂变产生的能量为热源的集中供暖或分散供暖。目前，核能供暖主要有2种方式：低温核供暖和核热电联产[28]。低温核供暖已形成池式供热堆和壳式供热堆2种主流技术，单个模块供热能力在200兆瓦左右，可满足400万平方米用热需求；核热电联产的综合能源利用率可达80%，单台1 100兆瓦电力机组供热能力超过2 000兆瓦，供热面积达5 000万平方米。NHR200-Ⅱ型低温堆热电联产系统（图8）[29]是该技术的典型。

核能供热前景广阔，近年来核能供暖产业已在我国北方地区积极推进。中国核工业集团、中国广核集团、国家电力投资集团及清华大学等单位已经在黑龙江、吉林、辽宁、河北等多个省份开展了相关厂址普选与产业推广工作。

4 我国清洁供暖存在问题与解决路径

4.1 存在问题

4.1.1 清洁取暖科学评价指标有待统一

清洁取暖技术种类较多，百花齐放[30-34]，但评价指标一直无法统一，缺乏普适性。有些指标过于简

③ 国家发改委，国家能源局．关于促进生物质能供热发展的指导意见．[2017-12-06]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201712/t20171228_3085.htm.

图 7　可移动式烟气余热储热供暖装置结构简图 [26,27]

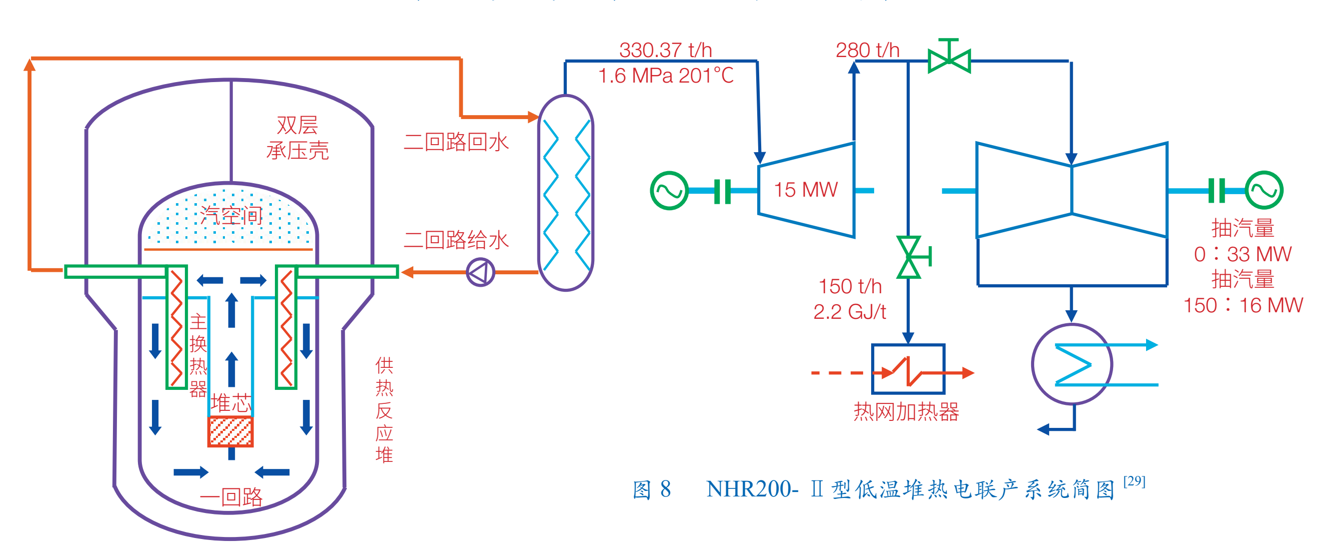


图 8　NHR200- Ⅱ型低温堆热电联产系统简图 [29]

单，只关注其经济性指标，往往忽略取暖方式是否与当地的能源布局及生态环境相适应等问题；有些指标过于繁冗，需要建立复杂的数学模型，可操作性不强。这就使得清洁取暖技术市场鱼龙混杂，很难以统一标准衡量某项技术的优劣。

4.1.2 供热管网与现有建筑物能效水平有待提升

（1）供热管网。目前，我国城镇集中供热管网总里程已达到48.8万公里，其中75%为城市集中供热管网，但室外管网的输送效率仅为70%。究其原因：① 硬件设施方面，供热管网的结构布局不合理，支状

管网较多，导致管网水力失调问题严重。再者，部分老旧管网因运行维护不到位，“跑冒滴漏”等问题严重，还有管网凝结水问题、管网保温问题等，这些都可造成整个供热管网的输送效率下降；② 软件设施方面，供热系统的调控技术水平落后，因大部分热网末端热用户未采用实时热计量措施，使得现有的供热系统只是对设备的粗放型调节，无法根据热用户的需求对整个供热系统进行精准调控，导致管网过量供热或供热不足现象时有发生。

（2）现有建筑物。维护结构保温性能差的问题普遍存在；因受经济发展及保温改造成本的影响，小城镇和广大农村地区问题尤为严重。例如：外墙无保温；窗户为单层玻璃；门窗缝隙漏风严重等。这些都会导致建筑物室内能耗增加，难以满足节能建筑的要求。

4.1.3 多方共赢长效机制有待建立

目前，清洁取暖改造资金主要来自 3 个方面：中央财政试点城市奖补资金、地方财政补贴资金、社会资本投入。随着 2019—2020 年采暖期的结束，天津、唐山、石家庄等第一批北方地区清洁取暖试点城市3年示范期也将结束，清洁取暖工作将面临最终考核，而考核结果将直接关系到试点城市能否足额领取奖励资金。天津和济南已经宣布要延长清洁取暖运行补贴至 2022—2023 年采暖期结束，而唐山表示将分 3 年逐步取消运行补贴，其他城市尚未明确后续政策。

从清洁取暖试点城市情况看，即使存在补贴，其运行费用仍然比传统散煤取暖方式高。如果清洁取暖补贴逐步取消，后续工作如何展开将是一个棘手的问题。虽然河北省张家口市可再生能源示范区探索了一条“政府+电网+发电企业+用户侧”共同参与的“四方协作”发展之路，但有其特殊背景——张家口市域内蕴含丰富的风能、太阳能和生物质能等资源，为可再生能源开发与应用提供了良好的基础，这也是“四方协作”机制成功建立的关键点之一，但不具备全国大范围推广可行性。如何建立一套多方共赢的长效机制，是解决清洁取暖用户端长期可持续的关键所在。

4.2 解决路径

4.2.1 逐步建立清洁取暖科学评价体系

科学的清洁取暖评价体系需要相关的科研单位和供热企业联合攻关。应针对当前多种清洁取暖技术的优缺点，秉承“科学性、先进性、协调性、可操作性”的理念，将热力学、热经济学、环境经济学等相结合。从全生命周期角度，建议主要考察 3 个方面指标。

（1）能效指标。因燃煤、天然气、电能、地热能、生物质能、太阳能、工业余热、核能等能量品位高低不同，传统的㶲分析和能级平衡理论[35]无法充分考虑能量转换环节的转换效率，只能说明输入能量和用户之间的能量品质的差异。为此，江亿等[36]提出了能质系数的概念，即不同能源对外所能做的最大功与其总能量的比值。利用能质系数的概念，可更合理地反映各种形式能量品位的高低。电能的品位最高，可完全转换为功，能质系数为 1；其他能量形式的能质系数要根据实际对外做功的能力来分别确定。若达到同等的用户采暖要求，从节能角度考虑，采用能质系数较低的能量形式更为可取。

（2）经济指标。在进行不同能量形式的热源供暖系统经济性评价时，除了需要考虑初投资及后期的运行与维护费用外，还要结合热经济学结构理论[37]，将总成本分摊在供暖系统或供暖装置的全生命周期之内，考察构成系统或装置的各个组件的单位㶲成本，以获得系统或装置的平均㶲成本。若达到同等的用户采暖要求，从经济性角度考虑，平均㶲成本较低的供暖系统或装置性能更优。

（3）环境影响指标。针对不同能量形式的热源供暖系统对环境影响的程度不同，需要在同一个供暖周期内开展，不仅要考虑 CO_2、SO_2、NO_x 等污染物的影响，还要考虑构成系统或装置的各个组件自身材料

对环境的影响（如组件自身材料材质是否有毒有害、是否可循环利用等）[38]，之后才能测算出系统或装置的单位环境影响因子。若达到同等的用户采暖要求，从环境影响角度考虑，单位环境影响因子较低的供暖系统或装置将成为首选。评价指标的好坏需要经受实践的检验，并要不断进行修正与完善。

4.2.2 有序推进供热管网节能改造及采暖末端能效提升

受传统供热模式限制与改造费用的多重影响，供热管网节能改造和采暖末端能效提升不是一蹴而就的事情，需要重点突破，有序推进。针对供热管网的主要问题，先要进行性能评估，再寻求与清洁取暖技术最相适应的节能改造方案。针对建筑物维护结构保温性差的问题，优先改造能耗高、问题凸显的房屋，并鼓励探索政府、用户和供热企业三者共同分享成本与收益的新模式。这些工作将为后续智慧供热技术的全面展开提供有力的硬件支撑。

4.2.3 积极探索多方共赢长效机制

当前，清洁取暖市场化机制尚未建立，主要依赖政府直接投入，这就导致清洁供热项目盈利水平较低，市场积极性不高。为打破这种僵局：① 政府可开展相应的顶层设计与协调，消除体制障碍，根据各个城市与地方的特点，选择适用的清洁取暖技术，编制相应的技术指南，优化供暖规划；② 地方政府宜出台配套的政策措施，因地制宜，因时制宜，引导当地供热企业、投融资企业、热用户等积极参与清洁供热项目，探索新型的多方共赢机制，激活潜力市场。

参考文献

1 中国气象局. 大气环境气象公报（2018年）. 北京: 中国气象局, 2019.

2 Xu X, You S J, Zheng X J, et al. A survey of district heating systems in the heating regions of Northern China. Energy, 2014, 77: 909-925.

3 Wang J D, Zhou Z G, Zhao J N, et al. Towards a cleaner domestic heating sector in China: Current situations, implementation strategies, and supporting measures. Applied Thermal Engineering, 2019, 152: 515-531.

4 National Administrative Bureau of the State Owned Property of China. Statistical Yearbook 2017. Beijing: China Statistic Press, 2017.

5 国家统计局. 2019年国民经济和社会发展统计公报. [2020-02-28]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html.

6 Zhou N, Price L, Dai Y D, et al. A roadmap for China to peak carbon dioxide emissions and achieve a 20% share of non-fossil fuels in primary energy by 2030. Applied Energy, 2019, 239: 793-819.

7 江亿, 唐孝炎, 倪维斗, 等. 北京$PM_{2.5}$与冬季采暖热源的关系及治理措施. 中国能源, 2014, 36(1): 7-13, 28.

8 方豪, 夏建军, 林波荣, 等. 北方城市清洁供暖现状和技术路线研究. 区域供热, 2018, (1): 11-18.

9 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. 北方地区冬季清洁取暖规划（2017—2021年）. [2017-12-05]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.

10 Mazhar A R, Liu S L, Shukla A. A state of art review on the district heating systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 96: 420-439.

11 Thorsen J E, Lund H, Mathiesen B V. Progression of District Heating – 1st to 4th Generation. Denmark: Alaborg University, 2018.

12 Lund H, Østergaard P A, Chang M, et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. Energy, 2018, 164: 147-159.

13 张绍强. 民用煤清洁利用的障碍与机制. 煤炭加工与综合利用, 2019, (4): 1-4, 7.

14 刘亚非, 张有, 焦铭泽, 等. 北方农村地区供暖现状与对策. 煤气与热力, 2019, 39(1): A29-A32.

15 章永洁, 蒋建云, 叶建东, 等. 京津冀农村生活能源消费分析及燃煤减量与替代对策建议. 中国能源, 2014, 36(7): 39-43.

16 张鑫. 兰炭替代无烟煤高效清洁利用的研究. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 103-106.

17 刘新华, 韩健, 张楠, 等. 中国分散式民用供热技术现状分析. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 401-408.

18 张凤霞. 天然气在供暖应用中关键问题的研究. 济南: 山东建筑大学, 2017.

19 中国能源研究会能源政策研究中心. 中国天然气采暖（居民）需求分析. 北京: 中国能源研究会能源政策研究中心, 2019.

20 中国石油经济技术研究院. 2019年国内外油气行业发展报告. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2020.

21 煤控研究项目散煤治理课题组. 中国散煤综合治理调研报告2019. [2019-08-30]. http://coalcap.nrdc.cn/datum/info?id=101&type=1.

22 邢作霞, 赵海川, 葛维春, 等. 固态电热储能系统热力计算方法研究. 太阳能学报, 2019, 40(2): 513-521.

23 马伟斌, 龚宇烈, 赵黛青, 等. 我国地热能开发利用现状与发展. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 199-207.

24 李忠. 北方农村清洁供暖技术路径分析. 建设科技, 2017, (18): 28-31.

25 李峥嵘, 徐尤锦, 黄俊鹏. 中国太阳能区域供热发展潜力. 暖通空调, 2017, 47(9): 68-74.

26 姚华, 黄云, 郑新港, 等. 移动储热技术发展现状与问题探讨. 储能科学与技术, 2016, 5(6): 897-908.

27 黄云, 姚华, 郑新港, 等. 一种储能式换热装置: 中国, 2016112035246. 2019-02-12.

28 王建强, 戴志敏, 徐洪杰. 核能综合利用研究现状与展望. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 460-468.

29 王天峰, 尚德宏, 陈大明, 等. 低温堆在居民供热市场的应用前景. 区域供热, 2017, (4): 26-31.

30 张亮. 不同热源供暖性能的比较与评价研究. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.

31 李沛峰, 戈志华, 银正一, 等. 供热系统能耗评价模型及应用. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 19-28.

32 李振, 高智溥. 北方冬季供暖技术的评价与选择. 中国煤炭, 2018, 44(12): 135-140, 112.

33 岳云力, 訾振宁, 李顺昕, 等. 电蓄热技术在张家口清洁供热领域的适用性研究. 中国电力, 2018, 51(8): 112-116.

34 谷民安, 陈世杰, 武新芳. 天然气城市集中供热的经济性分析. 上海电力学院学报, 2019, 35(3): 298-300.

35 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 194-197.

36 江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究. 中国能源, 2004, 26(3): 27-31.

37 Erlach B, Serra L, Valero A. Structural theory as standard for thermoeconomics. Energy Conversion and Management, 1999, 40(15-16): 1627-1649.

38 Meyer L, Tsatsaronis G, Buchgeister J, et al. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. Energy, 2009, 34(1): 75-89.

Technology Status and Discussion on Challenges of Clean Heating in Northern China

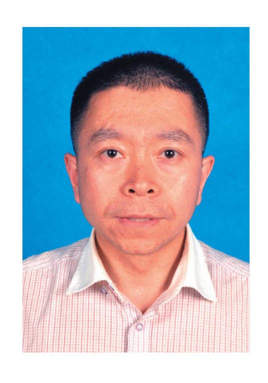
YAO Hua[1] HUANG Yun[1*] XU Jingying[1] MA Guangyu[2] WANG Yan[1] LIU Changpeng[2] SUN Shoubin[2]

（1 State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Technology Center, Angang Steel Co. Ltd., Anshan 114021, China）

Abstract In recent years, haze weather has frequently occurred in Northern China, especially in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Burning fossil fuels in winter, in the short term, is still a major method to get warm in Northern China because of the influences of economic cost and heating mode. Promoting clean heating is an important strategic decision of the Party Central Committee and the State Council. This article reviewed the development course of district heating in the first place. After that, the relevant policies of heating in the last ten years were briefly introduced. Moreover, the technical advantages and disadvantages of various clean heating, such as clean coal heating, natural gas heating, electric power heating, geothermal heating, biomass energy heating, solar energy heating, waste heat energy heating, nuclear energy heating, and so on, were analyzed in detail. Finally, the key common issues of clean heating were discussed and the solutions were proposed. In order to promote the sustainable development of clean heating in Northern China, it is necessary to focus on three aspects in the future. First, a scientific evaluation system of clean heating should be established. Major performance parameters including energy efficiency, economic index, and environmental impact index should be investigated in terms of the system's whole life cycle. Second, the energy-saving renovation of heating network should be sequentially promoted. It is suggested that systematic evaluation of the original heating system should be established before any modification. Finally, mechanism of long-term mutual win needs to be explored. Top-level design and coordination from the central government and regional support from the local government should be strengthened.

Keywords clean heating, district heating, technical analysis, scientific evaluation



姚 华 中国科学院过程工程研究所助理研究员。2013 年在浙江大学获得工学博士学位。主要研究领域为可再生能源存储与利用、能量转换系统集成与优化等。现主持国家重点研发计划课题子课题 1 项，已在国内外期刊发表论文 10 余篇，授权国家发明专利 4 项。E-mail: hyao@ipe.ac.cn

YAO Hua Assistant Professor at Institute of Process Engineering, Chinese Academy Sciences. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2013. After he became a staff of the Institute of Process Engineering, he has been working on renewable energy storage and utilization, and integration and optimization of energy conversion system. He is now the sub-project leader of National Key R&D Program of China. Up to now, he has published more than 10 journal papers and achieved 4 authorized national invention patents. E-mail: hyao@ipe.ac.cn

*Corresponding author



黄 云 中国科学院过程工程研究所研究员。2001 年浙江大学获学士学位，2004 年中国科学院理化技术研究所获硕士学位，2008 年美国爱荷华大学获博士学位，之后在美国佛蒙特大学和普林斯顿大学开展博士后研究。主要从事储能和清洁能源相关的研究工作。曾主持科技部“973”课题、国家自然科学基金项目课题、中国科学院重点部署项目课题等。已在国内外期刊发表论文40余篇，参与/合作专著3部。E-mail: yunhuang@ipe.ac.cn

HUANG Yun Professor at Institute of Process Engineering, Chinese Academy Sciences (CAS). She received her B.S. degree from Zhejiang University in 2001, M.S. degree from Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS in 2004, and Ph.D. degree from University of Iowa in 2008. After that, she continued post-doctoral trainings in University of Vermont and Princeton University, respectively. She joined the Institute of Process Engineering of CAS in 2011. Her research interests are energy storage and clean energy. Funded research projects include China “973” Research Program, the National Natural Science Foundation of China, and the Key Research Program of Chinese Academy of Sciences. She has published 40+ journal papers, and 3 academic books cooperated with others. E-mail: yunhuang@ipe.ac.cn

■责任编辑：张帆